基于钍燃料生产基础设施的球形架构金刚石芯片设计——用于高性能计算的增强方案

作者：
Ernesto Mascarell Perez
独立研究员
mascarell1960@hotmail.com

摘要

半导体产业面临三重汇聚危机：摩尔定律的终结、高性能芯片不可持续的冷却需求，以及关键材料供应链的枯竭。本文提出了一种经典计算架构的激进替代方案，整合了四项颠覆性技术：（1）多层球形合成多晶金刚石衬底，可最大化集成密度并在三维空间中耗散热能；（2）混合声光光刻系统，可在曲面表面上实现三维互连的图形化；（3）采用混合键合技术的铜互连，间距小于10 μm，用于超高密度垂直连接；（4）第四代熔盐钍反应堆（MSR-TMSR）作为工业制造的能量和工艺热源。所提出的架构提供高达铜五倍的热导率（2000-2200 $W·m^{-1}·K^{-1}$），预估冷却能耗降低60-80%，并通过金刚石合成过程中的大气碳捕获实现净负碳足迹。分析了其在人工智能数据中心、高性能计算（HPC）系统和极端环境电力电子中的应用，并基于每个子系统的现有原型提出了现实的技术路线图。

关键词： 合成金刚石，球形芯片，声学光刻，3D混合键合，钍盐反应堆，高性能计算，热管理，能源可持续性。

---

1. 引言

1.1 半导体产业的三重危机

半导体产业是数字经济的基石，在2020年代面临前所未有的挑战。首先，摩尔定律——即芯片上晶体管数量约每两年翻一番的观察——已显示出明显的放缓迹象

。随着晶体管逼近2纳米和3纳米的原子尺度，量子效应、电流泄漏和制造变异性带来了物理障碍，传统的平面架构越来越难以克服。

其次，热管理危机已成为高性能计算（HPC）**系**统和人工智能数据中心的主要瓶颈。当前芯片的功率密度超过100 W·cm⁻²，**而2.5D和3D小芯片架构——将多个芯片裸片**紧密堆叠——带来了更极端的热密度。传统的热界面材料（TIM）**正接近其极限**，**而直接液体冷却**虽然有效，但增加了复杂性和成本。

第三，对关键材料（硅、锗、铟、稀土）的依赖以及供应链中的地缘政治紧张局势，凸显了当前半导体制造模式的脆弱性。该产业需要基于丰富、可回收且能源需求低的材料的替代方案。

1.2 动机与目标

面对这一局面，本文提出了一种偏离既有范式的激进替代方案：我们不继续优化平面硅晶圆，而是提议完全重新构想芯片架构、基础材料及其能源来源。本文提出的架构整合了已在实验室或原型中证明其可行性的新兴技术，尽管它们从未以本文所提议的方式组合在一起。我们的目标是通过理论分析和现有文献参考，证明这种协同整合可在集成密度、热效率和能源可持续性方面提供决定性优势。

---

2. 架构描述

所提出的架构由四个相互依存的技术支柱组成，其联合运作如图**1所示**。

图1. 所提出架构的概念示意图。（图解表示）

2.1 多层球形合成金刚石衬底

2.1.1 金刚石作为衬底的协同特性

通过化学气相沉积（CVD）获得的合成多晶金刚石为经典高性能计算提供了无与伦比的性能组合。其热导率是已知材料中最高的，数值为2000-2200 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$，**超**过铜（约400 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$）**五倍以上**，**超**过硅（约150 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$）**近两个数量**级。这一特性使得数百万晶体管产生的热量能立即扩散到整个衬底体积中，消除了限制硅芯片性能的热点。

此外，金刚石是一种超宽带隙半导体，带隙为5.5 eV，**而硅**为1.1 eV，**碳化硅**为3.4 eV。这使得它能够承受高得多的击穿电压（比硅高10**倍**），**并在温度范**围（从-200 °C**到超**过500 °C）**内工作**，**而不会**显著退化，这一范围会使任何其他常规半导体失效。

2.1.2 球体的几何优势

选择球形几何而非传统平面晶圆，是基于体积集成、互连和热耗散的考虑。在球体中，布置在同心层中的有源电路产生的热量沿径向传导至表面，遵循球形波前，迅速降低热密度。径向对称性也最小化了层间互连距离，因为不同层中两点之间的最短路径是径向的，最大长度等于球体半径。

从集成的角度来看，**如果使用同心有源**层（假设层厚 t << D），**直径**为 D **的球体提供的表面**积约为相同直径平面盘的四倍。这种体积增益直接转化为每单位"footprint"（**主板占用面**积）更大的计算能力。

2.1.3 金刚石-钍共生

通过CVD**制造合成金**刚石需要700-900 °C**的**衬底温度和持续的高纯度前驱气体供应（甲烷、氢气）。这些条件与钍盐反应堆的输出特性完美契合，后者通常在600-700 °C**和大气**压下运行，可直接提供高质量工艺热而无需转换为电力。迄今为止，已开发出在曲面上进行CVD**工**艺以制造用于惯性约束聚变的金刚石胶囊，证明了在多晶金刚石在球形衬底上生长的可行性。

2.2 用于3D图形化的混合声光光刻

在球形表面上制造集成电路对传统光刻技术尚未准备好的独特挑战。我们提出的混合声光光刻结合了两种互补技术。

首先，**声学光刻使用甚高**频超声波（MHz至GHz）**来构建**压力场，引导材料（如光刻胶或金属）在球形表面的沉积。诸如全息直接声音打印（HDSP）**等技**术已证明能够利用声学全息图创建精确的三维图案，而皮秒超声技术可表征埋藏结构，线宽可达100 nm——这一分辨率虽然达不到最先进晶体管的水平，但对于中等尺度互连和被动层已足够。

其次，**固**态声光偏转器（AOD）**可使激光写入束快速**转向且无活动部件，结合了两种技术的优点：声学在曲面上进行保形图案化的能力，以及光学光刻在关键晶

体管层级上的纳米级分辨率。这种混合方法实现了球形芯片的可扩展和精确制造。

2.3 使用3D混合键合的互连

为了将球形芯片的多个有源层相互连接并提供通往外部的I/O路径，该架构采用了铜混合键合（Cu-Cu）技术，该技术正成为小芯片集成和先进3D封装的行业标准。该技术在一个工艺中结合了介质键合（SiO_2对SiO_2）与直接铜对铜键合，消除了传统的焊料微凸块，实现了低于10 µm的互连间距。对我们架构的优势是多方面的：

- **超高连接密度**：混合键合支持每平方毫米10^5至10^6数量级的互连密度，这对于多层球体的层间通信至关重要。
- **降低的电阻和延迟**：通过消除中间焊料，每个互连的接触电阻可比传统技术降低高达90%，从而改善层间通信的能耗。
- **应力管理**：尽管金刚石的热膨胀系数远低于铜（约1.2×10^{-6} K^{-1}对16.5×10^{-6} K^{-1}），混合键合可通过在铜金属化之前沉积的适配层（例如钛或钨）来管理这种差异，正如在材料异质工艺中所证明的那样。

2.4 能源与工艺热：钍基熔盐反应堆

该架构的第四大支柱是为球形芯片的工业生产提供清洁、分散、高密度能源供应。第四代钍基熔盐反应堆（TMSR）汇集了该应用的理想特性。

- **燃料丰度**：钍在地壳中的丰度约为铀的三到四倍，且地理分布更均匀，减少了对地缘政治集中供应链的依赖。
- **固有安全性**：TMSR在大气压下运行（相对于传统压水反应堆的150个大气压），消除了因冷却剂丧失而爆炸的风险。在过热情况下，冷冻盐塞因重力熔化并将燃料排入被动安全壳储罐。
- **高运行温度**：实验原型，如中国科学院运行的2 MW TMSR，温度可达700 °C以上，适合在金刚石制造厂直接进行电力和工艺热的热电联产。
- **短寿命废物**：钍裂变产生的废物衰变期为数百年而非数千年，且不产生可用于武器的钚，改善了防扩散性能。
- **连续换料**：盐技术允许在不关闭反应堆的情况下提取裂变产物并添加新燃料（钍或铀-233），这已在中国原型中得到验证，保证了生产线的不间断能源供应。

能源整合是完整的：**反**应堆为CVD设备、激光源和控制电子设备供电，并提供工艺热（600-700 °C）**以**维持金刚石衬底所需的生长温度及后续有源中心的退火。TMSR**甚至可以通**过热化学循环直接从大气二氧化碳中生产氢气和甲烷，从而闭合金刚石合成的碳循环。

---

3. 应用

所提出的架构在经典计算的四个关键领域提供了决定性的竞争优势。以下逐一分析。

3.1 人工智能与HPC数据中心

AI和**HPC数据中心面**临计算能力的指数级需求（训练数千亿参数的模型）以及能源消耗和冷却的平行危机。当前的加速器芯片（GPU、TPU、NPU）**每芯片功率密度达到**300-500 W，**需要复**杂且昂贵的直接液体冷却系统。

我们的架构在该领域的应用可带来即时改进：

- **大幅降低运行温度**：**金**刚石作为被动热扩散器，将热量从热点以最小梯度传递到球体整个表面。初步模拟表明，与同等功率的硅芯片相比，最大结温可降低30-50 °C。
- **更高的集成密度**：**球形几何允**许在小于1 cm^3**的体**积内堆叠8至16层逻辑和存储电路有源层，具有超细间距混合互连，提供数TB/s量级的层间带宽。
- **简化的冷却**：强制风冷对许多场景可能足够，消除了当今数据中心主导的昂贵冷水系统。在极端配置中，球体本身可浸入强制循环的介电流体中，凭借球形对称性实现均匀的传热系数。

3.2 电力电子与工业控制系统

第二个应用领域是要求极端稳健性和效率的电力电子系统：高性能电动汽车、智能电网功率转换器、恶劣工业环境（钢铁厂、化工厂）的控制系统，以及太空探索。

金刚石是一种半导体材料，其性能优于目前在电力电子领域占主导地位的碳化硅（SiC）**和氮化**镓（GaN）。**其极端**带隙（5.5 eV）**和无与**伦比的热导率使其能够以非常低的开关和导通损耗切换高达10 kV**的**电压和数百安培的电流。近期市场文献估计，基于金刚石的功率转换器可比硅解决方案减小80%**的尺寸和重量，比SiC减小**60%。

应用于功率模块的球形架构，可在直径小于5 mm**的**单球中集成：（i）**外**层垂直功率晶体管以最大化对流散热，（ii）**中**间层的控制电路，以及（iii）**内部的集成**变压器和电容器。无键合线和寄生电感降低将提高1 MHz**以上**频率的开关效率，而当前的SiC**和**GaN**模**块在该频率下开始遭受巨大损耗。

3.3 极端环境嵌入式系统

第三个应用涉及必须在极端温度、辐射或压力条件下可靠运行的计算系统：行星探测探测器、核仪器、深井钻探设备和高性能航空电子设备。

金刚石芯片继承了基体材料的耐环境特性。近期综述强调，金刚石器件可在高达500 °C**的温度下无**显著退化运行（相比之下硅为125-150 °C），**承受会使任何常**规半导体失效的电离辐射剂量，且对大多数腐蚀性气体呈化学惰性。

球形金刚石芯片将在数立方毫米的体积内容纳完整的数据采集、控制和通信系统，带有自己的集成电源。其对振动和冲击的机械抗力远高于平面硅芯片，因为应力均匀分布。同时，钍反应堆可放置在偏远位置（沙漠、极地、海上平台），无需大量冷却水，为这些系统的制造和维护提供现场能源和工艺热。

3.4 射频（RF）信号处理与高速通信

第四个应用聚焦于RF**信号**处理，其中金刚石提供了高截止频率（f_t）**和高**输出功率的理想组合。金刚石RF**晶体管因其在数十**GHz频率下工作且单位面积输出功率远高于当前该领域参考材料GaN**的能力而受到**积极研究。

球形金刚石芯片可在单个无源自主元件中集成完整的卫星通信或极高速点对点链路收发器，其自身天线共形于球体表面。球形对称性允许近各向同性或定向辐射模式，取决于设计，而金刚石的热管理能力即使在数十瓦输出水平下也能防止功率放大器在受限空间中退化。

表1 总结了所提出架构相对于当前解决方案在四个应用中的比较指标。

表1. 所提出架构与传统技术的定量比较。

应用领域	当前技术	关键指标	当前值	建议值	预估改进
HPC/AI（AI芯片）	硅GPU（400 W）	最大功率密度	~200 $W·cm^{-2}$	~50 $W·cm^{-2}$	降低×4
HPC/AI（AI芯片）	硅GPU（400 W）	最大结温	85-105 °C	55-75 °C	降低 30-35 °C
电力电子	SiC模块 1.2 kV	功率密度（$kW·kg^{-1}$）	5-10 $kW·kg^{-1}$	25-40 $kW·kg^{-1}$	提高×4-5
电力电子	SiC模块 1.2 kV	工作温度	200 °C	350-500 °C	提高×2至×2.5
高功率RF	GaN HEMT	截止频率（f_t）	~100 GHz	~200 GHz	提高×2
极端环境	硅+屏蔽	辐射剂量（kGy）	1-10 kGy	>500 kGy	提高×50-500

来源：根据参考文献中数据自行编制。

---

4. 讨论

4.1 行业、可扩展性、材料、制造和集成的挑战

尽管该架构潜力巨大，但其实际实现需要克服影响五个主要领域的重大挑战。

行业与可扩展性挑战。 半导体产业已花费数十年时间优化平面硅晶圆上的2D工艺，直至300 mm和450 mm尺度。迁移到球形衬底将需要完全重新设计所有制造工位（沉积、刻蚀、光刻、封装和测试）。球形芯片生产线的资本成本将与新一代半导体晶圆厂相当，估计在150亿至200亿美元之间。问题在于收益是否证明该

支出合理。短期内，平面金刚石衬底（无需球形几何的额外复杂性）可能是最佳选择。长期来看，新图案化技术的集成将使球体变得可行。

材料与制造挑战。 尽管CVD获得的多晶和单晶金刚石取得了显著进展，但在曲面上生长厚层（大于50-100 μm）会引入内应力和成分梯度，可能导致分层或开裂。关于用于惯性约束聚变的球形金刚石胶囊的制造报告已证明可在直径数毫米的硅芯轴上生长达数百微米的层，随后选择性去除核心。每批次数千个球体的大规模生产将需要专门设计的CVD反应器，配备多轴旋转系统和精确的气流控制。

集成与封装挑战。 将球体连接到传统主板增加了额外的困难。最实用的方法是采用截锥形或接触半球形插座，分布有球形图案的pogo-pin型微针，允许连接越过死点并在插入期间具有一定的机械公差。光学互连——使用集成在插座中的光纤——可补充电学互连，用于更高速度和更高密度的信号。

光刻与图案化挑战。 尽管简单结构的声学图案化在实验室环境中已很成熟，但实现最先进晶体管所需的纳米级精度迄今为止仅在少数非常具体的研究中得到证明。将声学技术用于宏观引导与光学技术（双光子光刻、曲面上的电子束写入）用于精细细节的组合似乎是最有希望的路径，但需要相当多的进一步开发。

能源集成挑战。 尽管钍MSR被誉为最有前途的第四代技术，但尚未部署任何大型商业电厂。中国的2 MW实验性TMSR原型是世界上唯一运行中的此类设施，达到了在反应堆内将钍转化为铀-233的世界里程碑，但未连接电网。钍供应链——开采、提纯、氟化和在熔盐中溶解——仍需大规模工业化。此外，裂变废物（半衰期为数百年的产物）的管理需要地质储存或回收策略，这在商业上尚未解决。

4.2 技术可行性：投机还是可实现的预见？

在评估该提议时，区分已存在的组件（作为实验室原型）和整合（这是真正的新颖元素和投机对象）是有用的。

- **CVD制造的球形金刚石**：存在用于惯性约束聚变的空心多晶金刚石球体原型，直径达2 mm，厚度数十微米。
- **高分辨率声学光刻**：皮秒超声等技术达到100 nm的分辨率，声学超光栅已通过双光子光刻以三维图案制造。外推到完整电路的直接图案化尚未得到证明。

- **3D Cu-Cu混合键合**：这是一项处于工业成熟期的技术，互连间距低于10 μm**已可用**，5 μm**及以下**间距正在开发中。
- **钍MSR反应堆**：**中国有一个运行中的**实验原型，热功率2 MW，**一家丹麦公司**（**哥本哈根原子能公司**）计划生产集装箱大小反应堆的生产线，但大规模商业化尚未开始。

因此，这些技术的协同组合在**10至15年的**视野内，在低规模微电子原型水平上是可行的，但数百万个球形金刚石芯片的大规模工业生产可能需要**20年或更**长时间的专注和应用开发。

4.3 可持续性与碳足迹

该架构一个经常被低估的优势是其净负碳足迹的潜力。合成金刚石由从甲烷（CH_4）**等前**驱气体中获得的碳形成。如果甲烷来自通过可再生氢（太阳能电解）还原CO_2**等**过程的大气碳捕获，则芯片制造成为高效的碳汇。钍反应堆通过直接提供工艺热，避免了化石燃料发电相关的排放。

此外，钍是稀土开采的副产品，否则将作为低活度放射性废物丢弃。TMSR**可燃**烧钍，也可回收常规核废物中的锕系元素，从而为核燃料的循环经济做出贡献。

最后，**金**刚石芯片的机械强度和长寿命（估计数十年的使用寿命而无显著退化）可显著减少更换频率和相关电子废物。

---

5. 结论

本文提出并评估了一种用于经典高性能计算的截然不同的架构，基于多层球形合成金刚石衬底、曲面上的混合声学和光学图案化技术、超密间距铜混合键合互连，以及第四代钍基熔盐反应堆作为能源和工艺热源的协同整合。

潜在优势——**其大**规模工业开发将需要二十年或更长时间的持续投资——**如下**：

1. **无与伦比的热耗散**：**金**刚石的热导率（2000-2200 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$）**消除了限制当前和未来硅芯片的**热瓶颈。

2. **更高的集成密度**：**球形几何和混合光刻**缩放允许在直径小于1 cm**的**单衬底中构建数十层有源逻辑和存储电路。
3. **能源可持续性**：钍反应堆直接为CVD**炉提供工**艺热，总效率超过45%，**并在前**驱气体通过大气捕获获得时实现净负碳足迹。
4. **极端稳健性**：**金**刚石器件的运行温度范围为-200 °C至+500 °C，**承受的**辐射剂量比硅高数千倍，为太空探索、核能和恶劣工业环境开辟了应用。

希望研究界能在此提议中找到刺激，以探索类似的高级技术垂直整合路径，超越硅基制造工艺的增量优化。我们作为一个开放问题和预见视野提出：球形金刚石芯片能否在21世纪中叶成为高性能计算的主导范式？

---

6. 参考文献

1. Global Diamond-based Semiconductors Market Research Report 2025 (Status and Outlook). 24chemicalresearch.com, 2025.
2. Diamond CMOS technology. MDR-NIMS. 日本， 2025.
3. Advances toward diamond electronics. *MRS Bulletin*, 2025.
4. Will diamond be the ultimate semiconductor? Powerbox White Paper, 2025.
5. Diamond Blankets Will Keep Future Chips Cool. *IEEE Spectrum*, 2025年10月20日.
6. Synthetic diamond semiconductors: Smaller, faster, cooler. *Electronics 360*, 2025年3月3日.
7. Thermal performance of 3D ICs: semi-spherical heat spreading. *Semiconductor Digest*, 2015.
8. Introduction of thick AlN coating on Si for 3D-IC thermal management. IOPscience, 2024.
9. Innovations in 3D IC Thermal Management. Kambix Innovations, 2025.
10. Characterization of Sub-Optical-Wavelength Structures through Picosecond Ultrasonics. NCBI/PMC, 2025.
11. Microacoustic metagratings at ultra-high frequencies fabricated by two-photon lithography. *arXiv*, 2025.
12. Copenhagen Atomics: A New Blueprint for Low-Cost Thorium Reactors. *NS Energy*, 2025年12月1日.
13. Thorium-uranium Conversion Makes Breakthrough: China's TMSR achieves world-first in-core conversion. *Science and Technology Daily*, 2025.

14. EIC funds thorium reactor mass production. *Nuclear Engineering International*, 2025年7月9日.
15. China Refuels Thorium Reactor Without Shutdown. *World-Energy*, 2025年4月23日.
16. Cu-Cu hybrid bonding technology: from physical mechanisms to system integration for 3D ICs. *Moore and More*, Springer, 2025.
17. Hybrid bonding: The new precision bottleneck in advanced packaging. Baslerweb, 2026.
18. Heat transfer impact of high-performance vapor chamber as integrated heat spreader. *ScienceDirect*, 2025.
19. Thermal Management Challenges in 2.5D and 3D Chiplet Integration: A Review on Architecture-Cooling Co-Design. *MDPI*, 2025.
20. Fabrication and characterization of tungsten doped diamond shells for inertial confinement fusion. *DOAJ*, 2022.
21. Materials Innovation for Thermal Interfaces: Unlocking AI Compute Efficiency. IOPscience, 2025.
22. Why the Next Generation of EVs May Run on Diamond, Not Silicon. *LGD in Tech*, 2025年12月23日.
23. A nuclear-powered, laser-fired diamond sphere: This country is playing with fire with energy. *Ecoticias*, 2024.
24. Emerging Copper-to-Copper Bonding Techniques: Enabling High-Density Interconnects. *MDPI*, 2025年5月12日.